

УДК 621.745.5

Поступила 24.05.2017

ДВИЖЕНИЕ И СМЕШИВАНИЕ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ В РОТАЦИОННЫХ ПЕЧАХ

THE MOVEMENT AND MIXING OF DISPERSED MATERIALS IN ROTARY FURNACES

С. Л. РОВИН, УП «Технолит», г. Минск, Беларусь, ул. Я. Коласа, 24. E-mail: technolit@tut.by,
Л. Е. РОВИН, В. А. ЖАРАНОВ, В. С. МАЗУРОВ, Гомельский государственный технический
университет им. П. О. Сухого, г. Гомель, Беларусь, пр. Октября, 48. E-mail: kaf_metallurgy@gstu.by

S. L. ROVIN, Technolit Co, Minsk, Belarus, 24, Kolasa str. E-mail: technolit@tut.by,
L. E. ROVIN, V. A. ZHARANOV, V. S. MAZUROV, Gomel State Technical University named after
P. O. Sukhoi, Gomel, Belarus, 48, Ochyabrya ave. E-mail: kaf_metallurgy@gstu.by

В статье рассматриваются вопросы движения и тепломассообмена в слое дисперсного материала, находящегося в ротационной печи. Представлены результаты комплексного исследования этих процессов, включающие натурные эксперименты, имитационное и компьютерное моделирование, которые позволяют оптимизировать конструкцию и параметры работы ротационных печей.

This article describes motion and heat and mass transfer in the layer of dispersed material in a rotary furnace. Presents the results of a comprehensive study of these processes, including pilot studies, computer modeling and simulation, which allow to optimize the design and process parameters of rotary furnaces.

Ключевые слова. Дисперсные материалы, нагрев, перемешивание, ротационные печи, моделирование.

Keywords. Dispersion materials, heating, mixing, rotary furnaces, simulation.

Эффективность тепловой обработки дисперсных материалов в процессах тепловой сушки, нагрева, обжига, плавки определяется интенсивностью тепломассообмена между газом-теплоносителем и слоем материала, а также непосредственно в слое частиц. Теплообмен в слое определяется характером движения материала, который может изменяться от статического (при неподвижном слое) до динамического (при перемешивании частиц) или взвешенного (псевдооживленного, при продувке слоя потоком газов).

Режим нагрева дисперсного материала во взвешенном состоянии отличается высокими скоростями, а установки, его реализующие, соответственно высоким термическим КПД. Однако применение таких установок возможно лишь для материалов с относительно узким спектром дисперсности, например, для песка. В остальных случаях (при термообработке полидисперсных материалов, таких, как стружка, окалина, шламы и т. п.), как правило, используются ротационные (вращающиеся) печи, где материал перемешивается при пересыпании.

Поток газов-теплоносителей, проходя над поверхностью материала, передает тепло и нагревает их за счет конвекции и частично излучения. Очевидно, что тепловому воздействию газового потока подвергается только тонкий верхний слой. Линейные скорости газов не могут быть большими (более 5 м/с) во избежание уноса дисперсных частиц. При рабочей длине вращающихся плавильных (так называемые короткобарабанных) печей, составляющей 2–5 м, газы находятся в контакте с материалом не более 1 с. Соответственно КПД большинства печей такого типа не превышает 7–10%.

Для эффективной работы нагревательных вращающихся печей приходится увеличивать время пребывания газов-теплоносителей в рабочей зоне печей за счет увеличения их длины. В химической промышленности, производстве стройматериалов, металлургии используются так называемые трубчатые печи длиной 50–150 и даже 200 м при диаметрах 2–5 м. В литейном производстве применяются «малые» печи длиной 20–40 м для сушки песка, глины и т. п. Такое увеличение длины вращающихся печей

повышает КПД до 25–30%, но одновременно требует увеличения их энергетической мощности и соответственно объемов производства, возрастает сложность в управлении и эксплуатации оборудования. Применение подобных печей для плавки невозможно.

Появившиеся относительно недавно ротационные наклоняющиеся печи (РНП) с петлеобразным движением газов открывают новые возможности при обработке дисперсных материалов. Движение газов в таких печах носит сложный циркуляционный характер, при котором скорости вращения значительно выше поступательной скорости потока, что увеличивает время пребывания газов в рабочем пространстве, повышает эффективность передачи тепла материалу и уменьшает унос дисперсных и ультрадисперсных частиц. Однако в полной мере использовать преимущества таких печей не позволяет недостаточная изученность происходящих в них тепломассообменных процессов. Это связано прежде всего с трудностями проведения исследований динамического пересыпающегося слоя внутри вращающейся печи. Сложность натурных экспериментов не позволяет однозначно выявить и описать поведение дисперсного материала, строение слоя, его динамику, интенсивность перемешивания и т. п.

Попытки описания процесса и соответственно структуры слоя предпринимались рядом исследователей. Известны работы Н. Н. Васильева, Э. В. Дженике, Р. Л. Зенькова, Г. А. Гениева, В. Ф. Першина и др., в которых на основе положений механики грунтов рассматривались различные аспекты движения и строения слоев сыпучих материалов, распределения нагрузок, устойчивости и т. п. [1, 2]. Однако условия в РНП и характеристики применяемых полидисперсных шихтовых материалов значительно отличаются от исследовавшихся в этих работах.

Для анализа движения дисперсного (сыпучего) материала и структуры слоя традиционно используют уравнения динамического равновесия сил, действующих на частицу (элемент) слоя, в которых учитываются только масса частички и центробежные силы, возникающие при вращении слоя [2]. К сожалению, эта упрощенная схема пригодна лишь для установок типа шаровых мельниц, так как не учитывает адгезионные свойства частиц.

Представления о движении и структуре слоя дисперсного (сыпучего) материала во вращающихся печах, используемые в механике сплошной среды, сводятся к упрощенной модели слоя, состоящей из двух зон: внутренней зоны транспортирования, где смешивания не происходит, и материал движется как плотное тело, и зоны активного смешивания или обрушения (рис. 1). Последняя зона располагается над линией обрушения, которая соединяет точки касания слоя материала в моменты захвата и отрыва от стенки печи.

Этой схеме соответствует математическое описание, в котором слой активного смешивания рассматривается либо как бесконечно тонкая пленка и сводится к характеристике поверхностного потока (рис. 1, а) [3], либо имеет конечную толщину (рис. 1, б) [4].

В последнем случае скорость в зоне обрушения равна:

$$U = \frac{1(a+x)\omega}{2h^2(x)}(y+h_0)^2 - \omega x, \quad (1)$$

где a – половина длины линии обрушения; x, y – текущие координаты ($x \rightarrow a$); h, h_0 – высота слоя в текущей и центральной (по диаметру печи) точках.

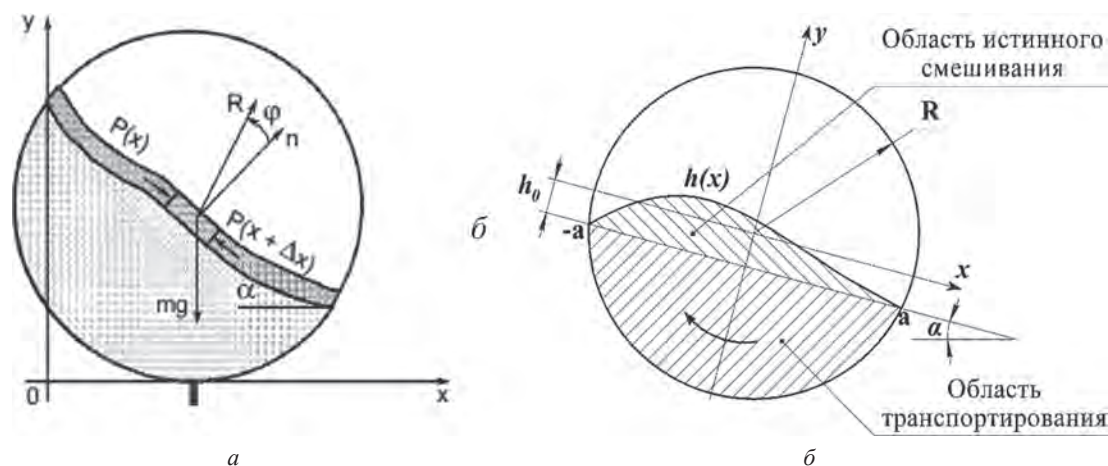


Рис. 1. Структура слоя дисперсного пересыпающегося материала во вращающейся печи: а – [3]; б – [4]

С учетом баланса сил для этой же схемы скорость частицы может быть определена из выражения:

$$U_S = k_S \frac{\sqrt{R/g}}{\rho V_k} (F_g - F_\alpha) \sin \alpha, \quad (2)$$

где R/g – временной масштаб данной системы; F_g и F_α – сила тяжести и интегральная сила давления на частицу со стороны примыкающих частиц – своеобразная «выталкивающая» (или боковая) сила; k_S – безразмерный коэффициент сегрегации; ρ и V_k – плотность и объем частицы. Переход частицы из скользящего поверхностного слоя в плотный транспортирующий возможен тогда, когда $F_g > F_\alpha$.

Схема «а» на рис. 1 в определенной степени может использоваться лишь для описания движения материалов, имеющих очень низкие адгезионные свойства, например, для сухого песка или стружки, нагретой до температуры 700–800 °С. Схема «б» имеет большее приближение к реальной структуре динамического слоя во вращающихся печах. Однако и в этом случае сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными дает значительные отклонения, что отмечается теми же авторами [4] (рис. 2).

При расчете движения реальных полидисперсных сыпучих материалов в ротационных печах, например дисперсных металлоотходов, помимо гравитационных и центробежных сил, необходимо учитывать силы аутогезии, которые определяют угол внутреннего трения, силы бокового давления, определяемые высотой слоя, удельной плотностью материала и коэффициентом Пуассона, а также особый пульсационный (перманентно-дискретный) режим движения слоя, при котором образуются динамически неустойчивые своды, создающие дополнительные горизонтальные силы, прижимающие частицы к стенке печи.

Боковое давление на стенки емкости, в которой находится дисперсный сыпучий материал, достаточно хорошо известно из практики эксплуатации бункеров в литейном и металлургическом производстве, в том числе с песком, окатышами, флюсами, коксом и т. д. [5–7]. В отличие от статического давления сплошной среды (жидкости) оно зависит не только от плотности и высоты столба материала, но и от его адгезионных и аутогезионных сил, и от режима движения слоя.

Масса столба (слоя) материала (G) и так называемая активная масса (P), воспринимаемая днищем, различаются:

$$P = G - P_c - P_k, \quad (3)$$

где P_c – сила трения о стенки; P_k – сила внутреннего трения слоев, перемещающихся относительно друг друга.

Активная масса достигает 40–45% от массы слоя при опускающемся материале, а при высоте слоя (H), большем диаметра емкости или разгружающего отверстия, стремится к нулю. Это явление «подвигания» материала хорошо известно в практике работы шахтных печей, а при работе с песком и другими сыпучими материалами оно приводит к неравномерной разгрузке. Если исключить влияние подпора газового потока, боковое давление материала (P_S) может быть получено из уравнения [5]:

$$dPF = \gamma F dh - \mu P_S \Omega dh, \quad (4)$$

где F – площадь сечения столба материала над плоскостью свода; γ – насыпная масса материала; Ω – периметр рассматриваемого элемента «свода»; μ – коэффициент трения о стенки.

Отсюда как предельный случай при $P = 0$:

$$P_S = \frac{\gamma F}{\mu \Omega}, \text{ Н/м}^2. \quad (5)$$

В реальных условиях движение слоя и, в частности, перемешивание определяются силами межчастичных связей (аутогезией) и внутреннего трения в слое, адгезией и силами трения на границе «материал – футеровка», силами инерции, бокового давления и силой тяжести. На верхний слой частиц, особенно при обрушении, действуют также аэродинамические силы скоростного потока газов. Силы бокового давления связаны с образованием в движущемся слое динамически неустойчивых сводов [6, 7]. Схема нагружения частиц слоя, учитывающая действие боковых (распорных) сил, приведена на рис. 3.

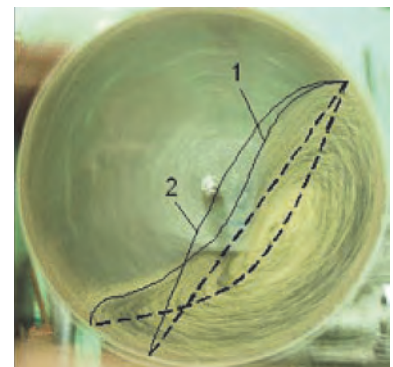


Рис. 2. Конфигурация динамического слоя во вращающемся барабане: 1 – контуры реального слоя; 2 – расчетные данные

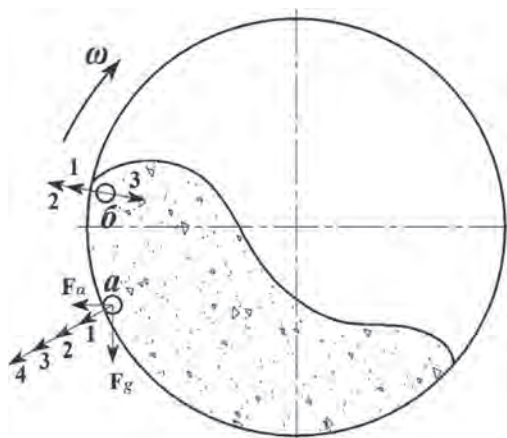


Рис. 3. Силы, действующие на элементы слоя: a – в «транспортной» зоне; b – в зоне отрыва: 1 – центробежные силы; 2 – силы адгезии; 3 – проекция силы тяжести; 4 – проекция силы бокового давления

Разрушение (разгрузка) слоя в верхней точке подъема (точка b , рис. 3) происходит при изменении баланса сил. Далее, после естественного торможения, вызванного силами аутогезии, что приводит к утолщению в верхней части слоя, происходит обрушение и ускорение скольжения частиц во встречном по отношению к «транспортной» зоне направлении. Это приводит к уменьшению толщины слоя в средней части (образуется характерная впадина). Затем по ходу скольжения по поверхности материала скорость частиц уменьшается, а угол наклона свободной поверхности слоя приближается к углу естественного откоса материала. Прогиб (впадина) на свободной поверхности слоя тем глубже, чем выше скорость вращения печи. После перехода за диаметр скорость частиц замедляется. В результате торможения образуется выходной валик. Затем частичка контактирует с поверхностью печи и начинается движение в направлении вращения, синхронное с внутренней поверхностью корпуса печи. В поперечном сечении динамический слой приобретает чечевицеобразную

форму, что хорошо заметно и в натурных условиях, и при имитационном моделировании (рис. 4).

С целью исследования движения дисперсных материалов в условиях РНП была разработана методика имитационного моделирования. Первые эксперименты проводили с использованием реальной окалины и стружки (рис. 5).

Однако при этом нарушается подобие соотношений размера частиц и диаметров печи и модели, а также адгезионных и аутогезионных сил, что сказывалось на конфигурации слоя и режимах движения частиц. Особенно очевидно это отличие для неподготовленной стружки, где силы аутогезии значительно превосходят силы адгезии. Слой при этом работает путем дискретного обрушения и скользящего верхнего слоя не наблюдается.

Адекватные результаты получены, когда модель выполнена на основе принципов гидродинамического подобия ($Re_{\text{мод}} \approx Re_{\text{РНП}}$) с учетом масштабного фактора, в частности, соотношения размеров моде-

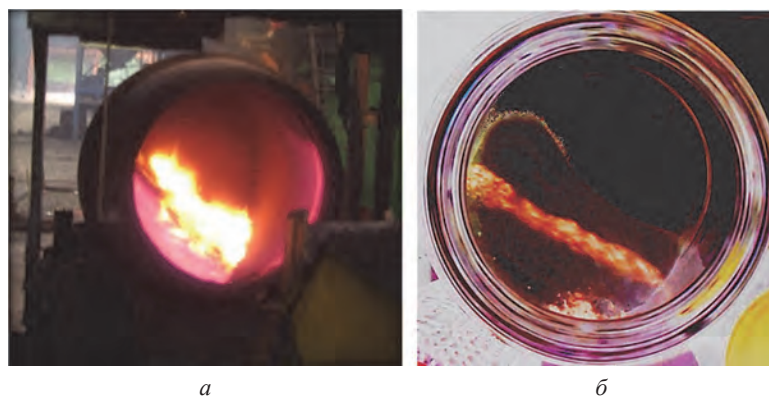


Рис. 4. Положение дисперсного материала при вращении: a – стружка при нагреве в РНП; b – имитационная модель

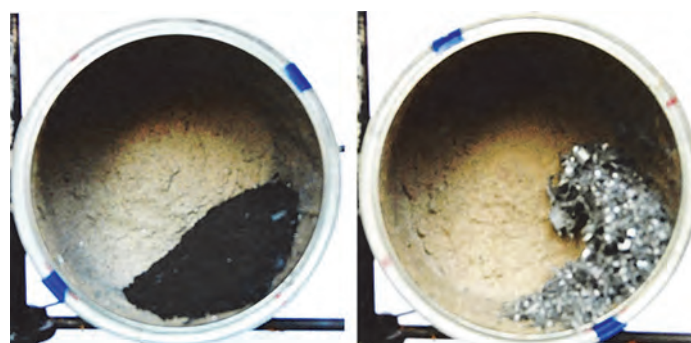


Рис. 5. Моделирование работы слоя окалины и стружки в ротационной установке: a – окалина с дисперсностью $d_{50} < 1 \text{ мм}$; b – стружка с дисперсностью $d_{50} > 2,5 \text{ мм}$ (вращение против часовой стрелки)

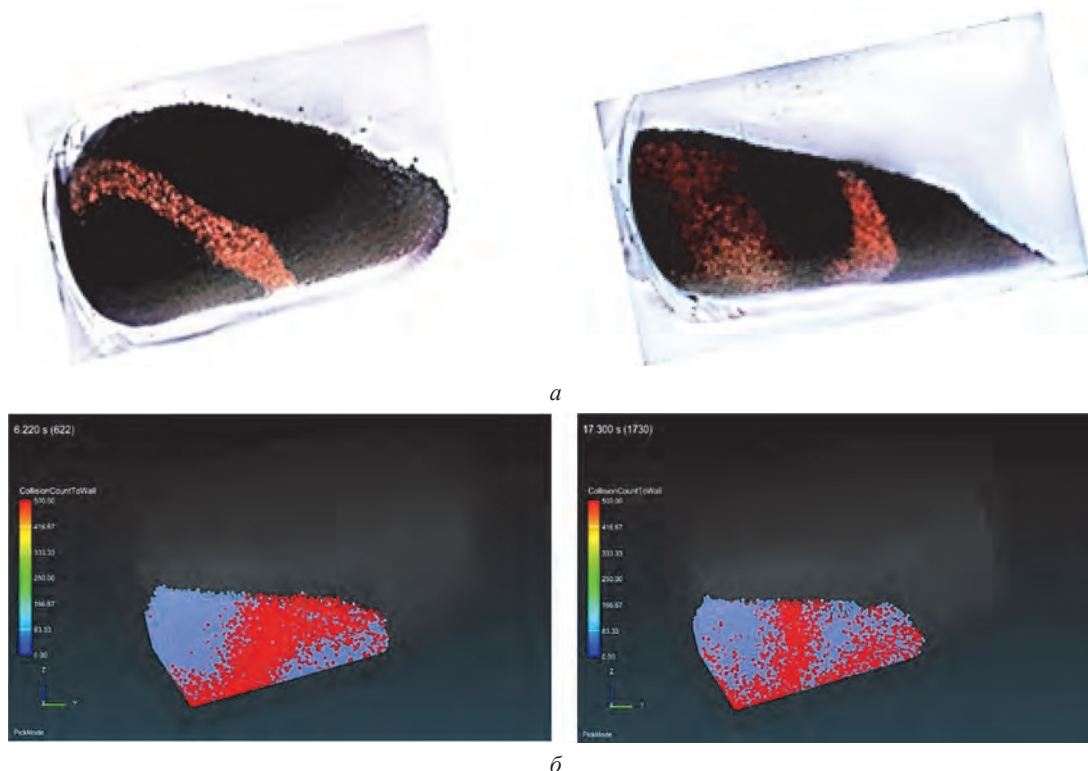


Рис. 6. Движение (перемешивание) дисперсных материалов, находящихся в РНП, в осевом направлении (слева – один оборот с момента начала вращения, справа – три оборота): *а* – имитационное моделирование; *б* – компьютерное моделирование

ли и частиц материала. Характерным подтверждением достигнутого гидродинамического подобия является формирование профиля слоя, идентичного реальному (см. рис. 4).

Путем имитационного моделирования установлено, что скорость «вращения» материала в ротационных печах значительно выше, чем скорость вращения корпуса печи. Это превышение зависит от относительного объема загрузки и величины сегмента, занимаемого материалом. При коэффициенте загрузки печи $V_{\text{мат}}/V_{\text{печ}} \approx 0,3$, что чаще всего используется, скорость вращения материала примерно вдвое превышает скорость вращения печи.

В РНП, имеющей рабочее положение под углом к горизонту (как правило, в пределах $12\text{--}18^\circ$), чем ближе материал находится к горловине печи, тем меньший сегмент окружности он занимает и тем быстрее вращается: больше оборотов совершает за один оборот печи. Градиент скорости в сечении слоя способствует перемешиванию материала и переносу тепла. Как показали дальнейшие компьютерные исследования, абсолютное значение градиента зависит от соотношения адгезионных, аутогезионных и гравитационных сил. При малом сцеплении материала с футеровкой, когда силы аутогезии превышают силы трения, материал начинает проскальзывать по поверхности печи, что замедляет обменные процессы.

Было обнаружено также, что перемещение материала в РНП в отличие от печей с горизонтальной осью вращения происходит не только в сечении, перпендикулярном оси вращения печи, но и в продольном направлении (рис. 6).

В сечении, перпендикулярном оси вращения, частицы, находящиеся во внешнем слое, перемещаются непрерывно: в зоне, примыкающей к поверхности печи, они движутся по окружности за счет сил адгезии и внешнего трения, а на свободной поверхности слоя скользят под действием гравитационных сил и сил инерции, преодолевающих силы аутогезии.

В продольном направлении от горловины печи к ее днищу частицы перемещаются дискретно – в момент обрушения слоя или скольжения по его поверхности.

Перемещение материала к днищу печи приводит к образованию в зоне, прилегающей к нему, придонного вала – области, приподнятой над уровнем свободной поверхности материала. При увеличении высоты вала под действием силы тяжести частички, находящиеся на его вершине, соскальзывают в направлении горловины печи. Это скольжение в сочетании со сдвигом от днища к горловине печи за счет бокового (распорного) давления формирует встречное движение материала в продольном направлении. В результате движение вдоль оси печи становится возвратно-поступательным, что в сочетании с враще-

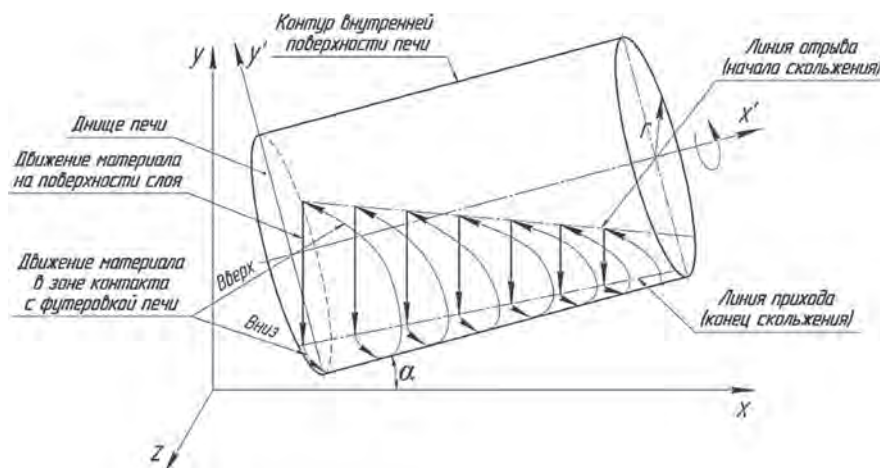


Рис. 7. Траектория движения частиц, находящихся на поверхности слоя материала в РНП

нием в поперечном сечении превращается в характерное для РНП винтовое возвратно-поступательное движение, обеспечивающее активное перемешивание материала как в радиальном, так и в осевом направлении. Схема движения частиц материала, находящегося на поверхности слоя в РНП, построенная по результатам комплексного моделирования, представлена на рис. 7.

Для определения количественных характеристик движения слоя и отдельных частиц материала в РНП, что необходимо для получения реальных параметров тепломассобмена, расчета и конструирования печей, было проведено компьютерное моделирование с помощью ППП CD-Adapco Star CCM+, Prometech ParticleWork и метода дискретных (конечных) элементов DEM (Discrete Element Method). STAR-CCM+ и ParticleWorks позволяют анализировать и корректировать данные и отслеживать развитие процесса по мере выполнения расчета [8].

Метод DEM в отличие от методов, которые применяются в молекулярной динамике, позволяет моделировать движение частиц с несферической поверхностью и активно используется для расчета движения большого количества частиц, таких, как песчинки, гравий, галька, и других твердых материалов [9]. Основным положением метода является то, что материал состоит из отдельных дискретных частиц, которые могут иметь различные поверхности и свойства. Моделирование начинается с помещения всех частиц в конкретное положение и придания им начальной скорости.

Расчет выполняли на основе мгновенного баланса сил тяжести, инерции и сил контакта рассматриваемых частиц с другими частицами и поверхностью печи. Частицы при этом рассматриваются как твердые и упругие тела, размер которых задается по данным натурных экспериментов с учетом масштабного фактора. Частицы совершают поступательное и вращательное движения. В расчете учитываются также силы аутогезии и адгезии.

Чтобы найти результирующую силу, воздействующую на каждую частицу, эти силы складываются. Для расчета изменения положения и скорости каждой частицы в течение определенного временного шага используется метод итераций. После того, как новое положение найдено, оно используется для расчета сил в течение следующего шага, и этот цикл программы повторяется до тех пор, пока процесс не стабилизируется или до окончания заданного времени. Фрагменты движения материала представляются в скалярной форме. Функцией скалярного поля является линейная скорость частиц.

Решающее влияние на распределение скоростей в слое и их абсолютные значения оказывают соотношение сил адгезии и аутогезии и их изменения, связанные с нагревом слоя и изменением характеристик поверхности частиц материала.

Движение частиц при моделировании описывали уравнениями поступательного движения – относительного сдвига и вращательного движения:

$$m \frac{d}{dt} v = F, \quad (6)$$

$$I \frac{d}{dt} w = T, \quad (7)$$

где m – масса частицы; v – скорость; F – сила; I – момент инерции; w – угловая скорость; T – крутящий момент.

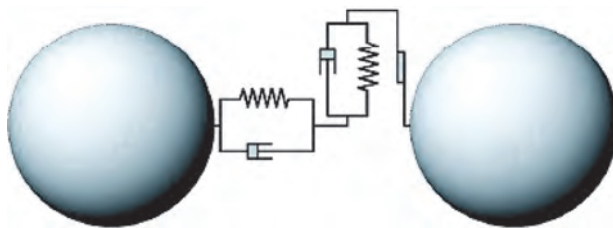


Рис. 8. Схема междоузличного взаимодействия

В случае сферической частицы момент инерции выражается следующим уравнением:

$$I = \frac{2}{5}ma^2, \quad (8)$$

где a – радиус сферической частицы.

Взаимодействие между частицами рассматривается как совокупность всех возможных контактов – упругого, вязкого и пластичного, и может быть представлено в виде схемы (модели), собранной из элементарных ячеек (рис. 8): жесткой пружины (упругость), демпфера (вязкость), ползуна (пластичность) [8].

Результирующее действие определяется характеристиками частичек и режимом их движения:

$$F_{\text{DEM}}^n = -k\delta^n - \eta(v_i^n - v_j^n), \quad (9)$$

$$F_{\text{DEM}}^t = -k\delta^t - \eta\left((v_i^t - v_j^t) + (r_i w_i) + (r_j w_j)\right), \quad (10)$$

где k – постоянная упругости; δ – деформация; η – коэффициент вязкого трения (демпфирования); v – скорость; r – расстояние от центра тяжести частицы до точки контакта; w – угловая скорость вращения частички; верхний индекс n обозначает нормальную составляющую; t – тангенциальную составляющую; индексы i и j – номер частицы.

Когда отношение тангенциальной и нормальной составляющей контактной силы превышает коэффициент трения μ , частица материала скользит по поверхности, что отражается с помощью модели пластичности.

В процессе компьютерного моделирования учитывали следующие основные физические, геометрические и технологические параметры, влияющие на характер движения дисперсных материалов во вращающихся печах: диаметр рабочего пространства (D); длина рабочего пространства (L); угол наклона печи ($\alpha_{\text{п}}$); скорость вращения печи ($v_{\text{п}}$); температурный режим ($t_{\text{н}}$, $t_{\text{к}}$); размер частиц (l_0); форма частиц; сила междоузличных связей (аутогезия) и внутреннего трения в слое (μ_s); сила трения на границе «дисперсный материал-футеровка» (адгезия) ($F_{\text{тр}}$); плотность частиц (ρ).

В результате численного моделирования впервые были получены не только представления о характере движения дисперсных материалов в ротационных печах с наклонной осью вращения, структуре слоя по всей длине печи, скоростях отдельных частиц, но исследован процесс смешивания или конвекции в слое, причем определены количественные значения каждого из параметров и их взаимосвязи с параметрами работы и конструкции печи.

Моделирование подтвердило, что в поперечном сечении слоя материала условно могут быть выделены относительно неподвижное ядро и активно циркулирующая вокруг него периферийная зона. При этом скорости движения частиц в ядре и на периферии слоя могут отличаться в десятки и даже сотни раз, однако четкой границы между зонами не существует. Кроме того, абсолютные значения и распределение скоростей меняются во времени и в зависимости от расстояния рассматриваемого сечения относительно дна или горловины печи.

Некоторые результаты моделирования движения материала в РНП представлены на рис. 9–12: на рис. 9 – распределение скоростей частиц материала в поперечном и продольном сечениях слоя в разные моменты времени и на разном расстоянии от горловины печи; на рис. 10 – процесс перемешивания (усреднения) состава, отражающий перераспределение температуры за счет конвективного теплообмена в динамическом (вращающемся) слое материала; на рис. 11 – число и продолжительность контактов частиц с поверхностью печи, позволяющие оценить количество тепла, получаемого слоем материала от стенок (футеровки) печи за счет теплопроводности; на рис. 12 – траектории движения отдельных частиц слоя материала, позволяющие не только определить скорость частицы в различные моменты времени,

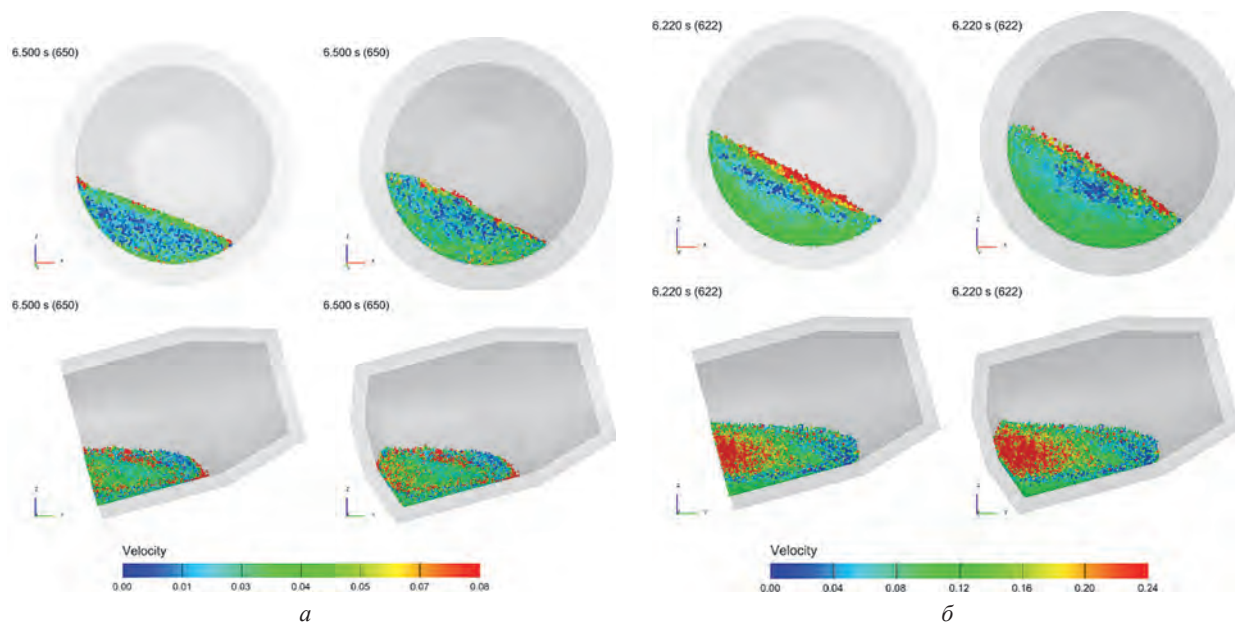


Рис. 9. Распределение скоростей дисперсных частиц в слое материала, находящегося в РНП: *а* – вращение печи со скоростью 5 об/мин; *б* – вращение печи со скоростью 10 об/мин

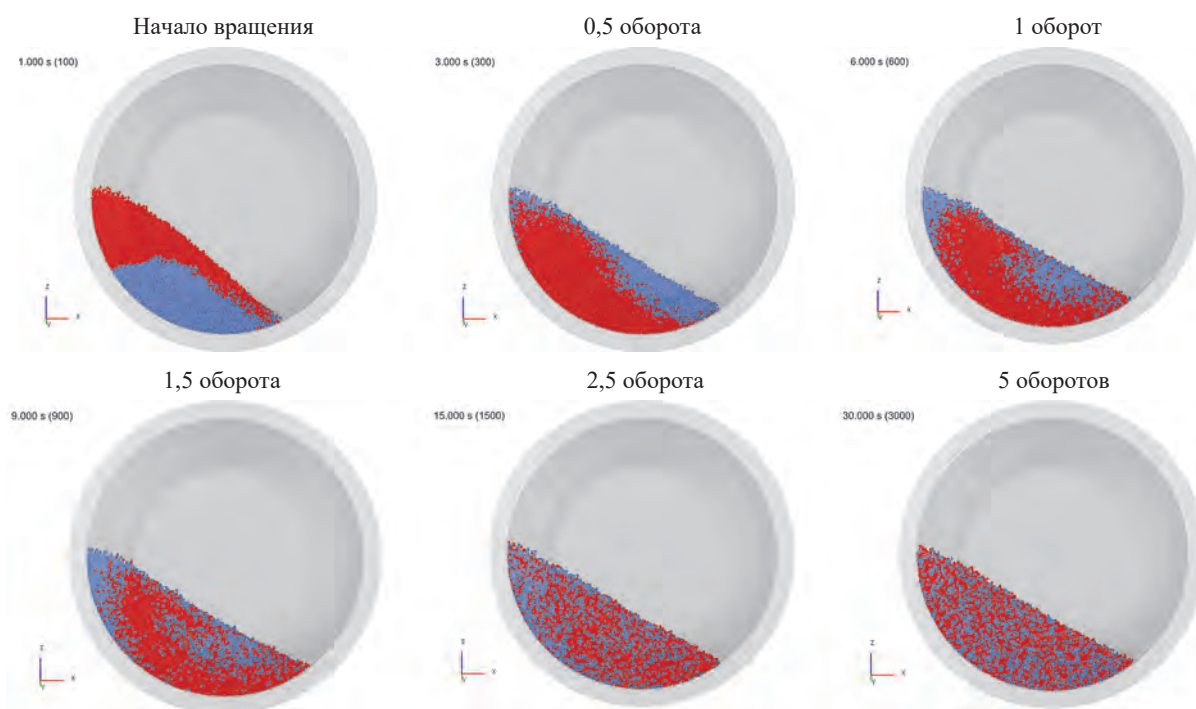


Рис. 10. Перемешивание материала в РНП (сечение у дна печи)

но и отследить ее перемещения: от зоны контакта с поверхностью печи к свободной поверхности слоя, из скользящего слоя в глубь «транспортной» зоны и обратно.

Изменения относительной скорости и положения отдельной частицы в слое материала показаны соответственно на рис. 13, 14.

Интенсивность контактов частиц с поверхностью печи на рис. 11 отражена цветом от синего до красного. Красный цвет характеризует 500 итераций и более, при которых частица была в контакте с футеровкой. Шаг (продолжительность) итерации составляет 0,01 с, т. е. частицы, окрашенные в красный цвет, были в контакте с футеровкой 5 с и более.

С учетом результатов комплексного моделирования движения дисперсных материалов и тепломассообменных процессов в ротационных наклоняющихся печах были определены оптимальные технологические режимы их эффективной работы, разработаны рекомендации по проектированию и приме-

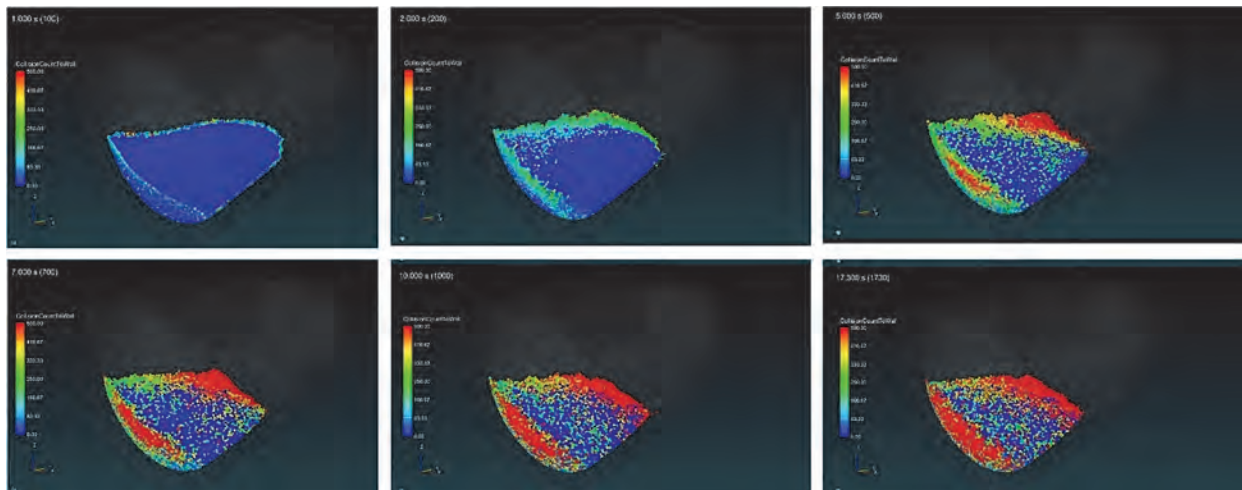
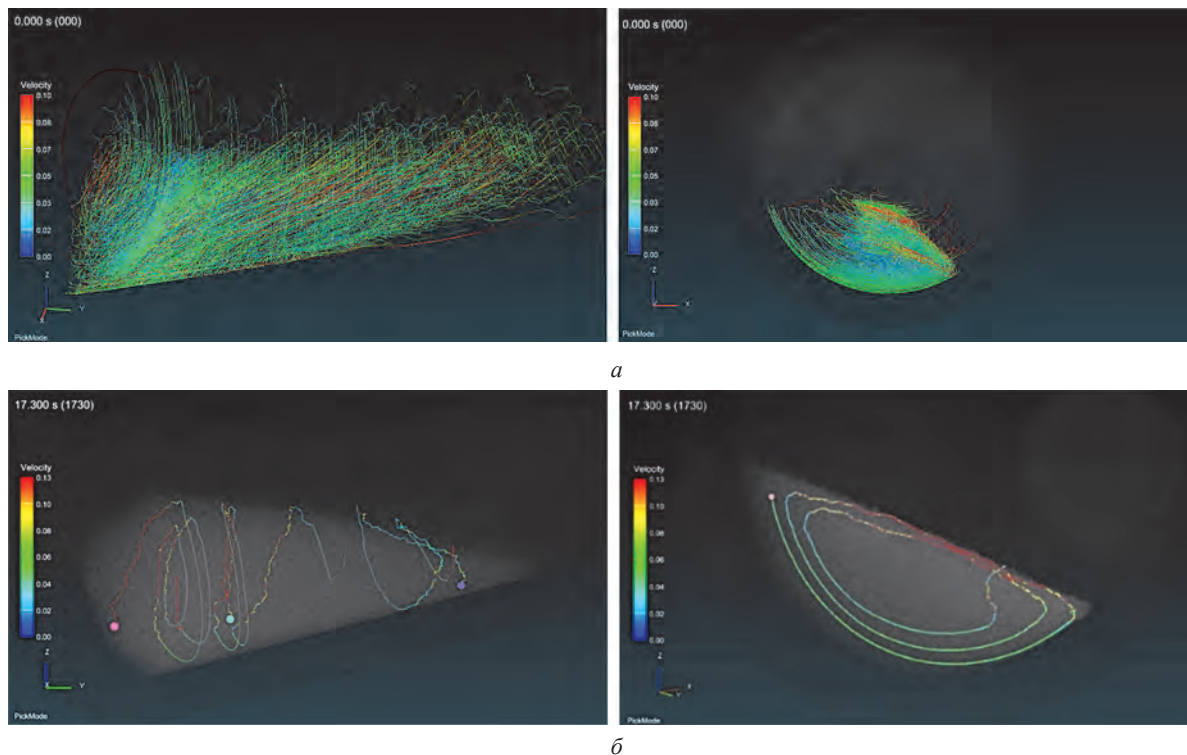


Рис. 11. Интенсивность взаимодействия материала с поверхностью печи



a

б

Рис. 12. Траектории движения частиц дисперсного материала в РНП (вращение печи по часовой стрелке): *a* – множество частиц; *б* – выборка по трем частицам (точки указывают положение частиц в момент окончания расчета)

нию, выполнены успешные внедрения РНП различного объема, производительности и назначения на предприятиях Беларуси и России (рис. 15).

Выводы

Впервые выполнено комплексное исследование движения дисперсного материала в ротационных наклоняющихся печах. При проведении исследования использованы данные натурных экспериментов, имитационное и численное (компьютерное) моделирование.

Установлено, что дисперсный материал в РНП в отличие от печей с горизонтальной осью вращения совершает сложное винтовое возвратно-поступательное движение, перемешиваясь как в поперечном, так и в продольном направлении, что приводит к интенсивному конвективному переносу и ускоряет процессы нагрева, восстановления и расплавления материала. Скорости движения частиц в пределах одного сечения отличаются в 100 раз и более. Вращение слоя дисперсного материала превышает скорость вращения печи более чем в 3 раза. Распределение скоростей в слое нестабильно, зависит от расстояния до горловины печи, толщины слоя и изменяется во времени.

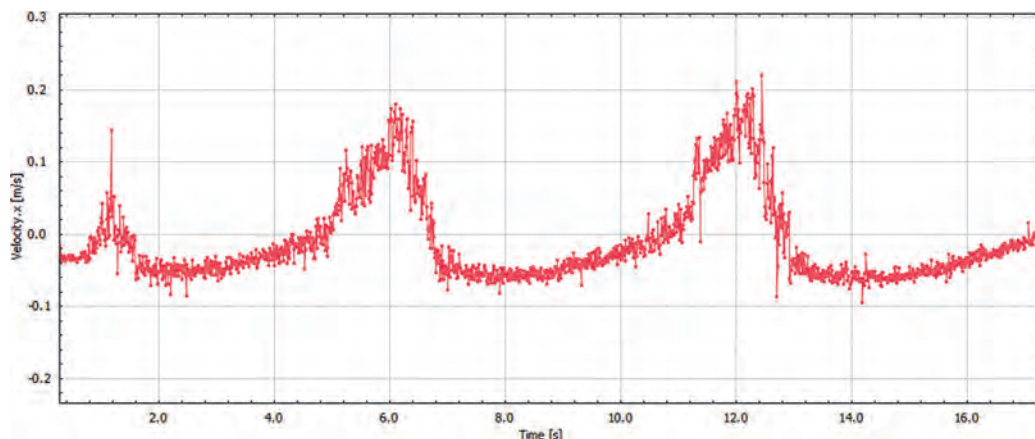


Рис. 13. Изменение линейной скорости частицы в горизонтальном направлении (по оси X)

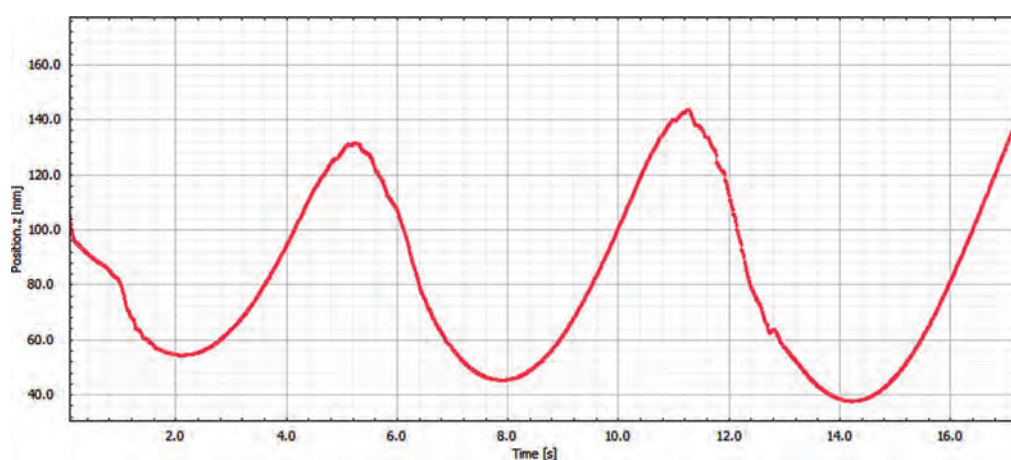


Рис. 14. Изменение положения частицы относительно вертикальной оси (оси Z)

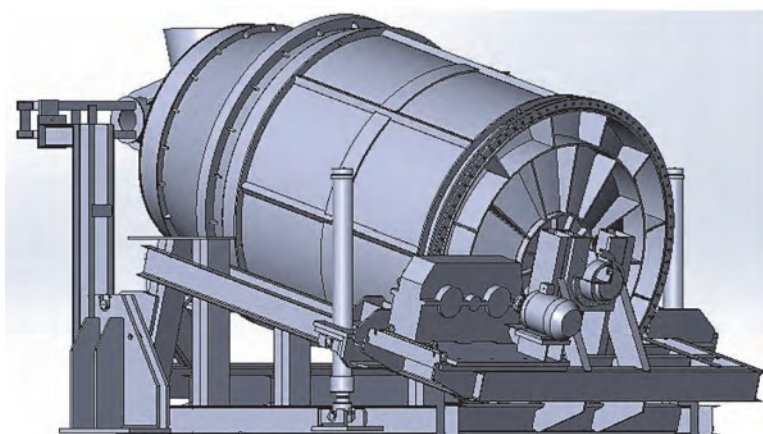


Рис. 15. Общий вид РНП-15 для производства чернового свинца из аккумуляторного лома

Характер движения материала в РНП зависит от адгезионных и аутогезионных сил, степени заполнения печи и скорости вращения корпуса. В процессе нагрева в динамическом слое геометрические характеристики материалов (размеры и форма частиц), их адгезионные свойства и характер движения претерпевают значительные изменения.

На основе полученных результатов определены параметры эффективной работы ротационных наклоняющихся печей, разработаны рекомендации по их проектированию и применению.

Литература

1. Зеньков Р. Л. Механика насыпных грунтов. М.: Машгиз, 1952. 215 с.
2. Першин В. Ф., Однолько В. Г., Першина С. В. Переработка сыпучих материалов в машинах барабанного типа. М.: Машиностроение, 2009. 220 с.

3. Ревуженко О. А. О перемешивании сыпучих материалов в тонких слоях // Физическая механика. 2004. № 7. Спец. вып. 4.2. С. 277–280.
4. Волков М. В. Метод расчета процесса смешивания сыпучих материалов в новом аппарате с открытой рабочей камерой: дис. ... канд. тех. наук. Ярославль, 2014.
5. Фялков Б. С., Плицын В. Т. Кинетика движения и характер горения кокса в доменной печи. М.: Metallurgiya, 1971. 288 с.
6. Варламов А. В. Исходные предпосылки к составлению обобщенной математической модели динамической системы «Бункерное устройство с сыпучим материалом – сводообразование» // Вестн. Самар. ГУПС. 2011. № 2. С. 79–89.
7. Ровин Л. Е., Ровин С. Л., Ткаченко А. В., Ходосок Н. Ф. Системы автоматизации вагранок // Литье и металлургия. 2000. № 4. С. 26–28.
8. Promtech Particleworks Theory Manual. Promtech Software, Inc., 2015. 48 p.
9. Norouzi H. R. et. al. Coupled CFD-DEM modeling: formulation, implementation and application to multiphase flows – Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2016. 416 p.

References

1. Zen'kov R. L. *Mehanika nasypnyh gruntov* [Mechanics of bulk soils]. Moscow, Mashgiz Publ., 1952, 215 p.
2. Pershin V. F., Odnol'ko V. G., Pershina S. V. *Pererabotka sypuchih materialov v mashinah barabannogo tipa* [Bulk material processing in drum machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009, 220 p.
3. Revuzhenko O. A. О перемешивании сыпучих материалов в тонких слоях [On the Mixing of Bulk Materials in Thin Layers]. *Fizicheskaya mehanika = Physical Mechanics*, 2004, no. 7. Spec. vyp. 4.2, pp. 277–280.
4. Volkov M. V. *Metod rascheta processa smeshivaniya sypuchih materialov v novom apparate s otkrytoj rabochej kameroj*: Diss. kand. teh. nauk [Method for calculating the process of mixing bulk materials in a new apparatus with an open working chamber. Cand. Tech. Science]. Jaroslavl', 2014.
5. Fialkov B. S., Plicyn V. T. *Kinetika dvizhenija i harakter gorenija koksa v domennoj pechi* [Kinetics of motion and the character of combustion of coke in a blast furnace]. Moscow, Metallurgija Publ., 1971, 288 p.
6. Varlamov A. V. *Ishodnye predposylki k sostavleniju obobshhennoj matematicheskoj modeli dinamicheskoy sistemy «Bunkernoe ustrojstvo s sypuchim materialom – svodoobrazovanie»* [The initial prerequisites for the compilation of a generalized mathematical model of the dynamic system «Bunker device with bulk material – arbor formation»]. *Vestnik Samarskogo GUPS = Bulletin of Samara State Unitary Enterprise*, 2011, no. 2, pp. 79–89.
7. Rovin L. E., Rovin S. L., Tkachenko A. V., Hodosok N. F. *Sistemy avtomatizacii vagranok* [Automation systems for cupola furnaces]. *Lit'jo i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2000, no. 4, pp. 26–28.
8. Promtech Particleworks Theory Manual. Promtech Software, Inc., 2015. 48 p.
9. Norouzi H. R. et. al. Coupled CFD-DEM modeling: formulation, implementation and application to multiphase flows. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2016. 416 p.